

방사성폐기물 처분장 주변 암반의 손상 영역 특성 고찰을 위한 BMT 모델

이희석 (GSUC팀, SK건설주식회사)

1. 서 론

고준위 방사성폐기물 처분장의 장기 운영 시 처분된 고준위 폐기물에 의해 생성되는 열로 인한 열-수리-역학(THM) 하중의 복잡한 작용에 의해 처분장 벽면은 심각한 손상을 받을 수 있다[1]. 많은 처분 후보지들은 결정질 암반 내에 위치하며 따라서 손상의 양상 역시 취성 파괴(brittle fracture)의 형태를 띤다[3].

방사성 폐기물 처분장 설계 및 성능평가를 위한 DECOVALEX-THMC 국제 협력 연구 프로젝트의 일환으로서 방사성폐기물 처분장 주변의 굴착 손상 영역 (Excavation Disturbed Zone, EDZ)에서의 열-수리-역학-화학(THMC)의 영향을 평가하기 위해 Task B의 BMT 모델(Benchmark Test)이 수립되었으며, 각 국가별 연구팀이 현재 연구를 진행 중에 있다. 이 연구 과제의 주요 내용은 균열 생성 및 전개, 블록 및 암석 이동, EDZ 응력의 상호작용, 암석 균열 수리적 특성 시간의존 거동의 영향 및 화학적 작용의 영향 등을 포함한다[5].

이 논문에서는 15년에 걸친 DECOVALEX 프로젝트의 주요 내용들은 간단히 소개하고, 이 중 현재 진행되고 있는 처분장 주변 암반의 EDZ에서 열-수리-역학 하중에 의한 암반의 영향을 평가하기 위한 Task B의 수행 내용을 정리하였다. BMT 모델을 통한 각 수치해석 모델링 결과들을 비교 하였으며, 이 중 처분 후 1백만 년까지 기간 동안 열-수리-역학 하중으로 인한 처분장 벽면에서 이산적인 균열들의 반응을 모사한 결과를 제시한다.

2. DECOVALEX 연구 프로젝트

2.1 DECOVALEX 프로젝트 개요

DECOVALEX (International co-operative project for the DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)¹⁾ 연구 프로젝트는 방사성폐기물 처분장 주변 암반의 복잡한 열-수리-역학 상호작용 현상의 규명 및 실제 처분장 설계 및 성능평가의 적용을 위해 1992년에 시작되어 현재까지 진행되고 있는 국제 협력 연구 프로젝트이다[2]. 1992년 Phase I이 시작된 이후 총 9개국 24 개 기관이 예산 및 연구팀을 구성하여 현재 DECOVALEX-THMC Phase IV의 4차 연구가 진행되고 있다.

1) <http://www.decovallex.com> 참조

표 1 및 표 2에 현재까지 진행된 각 단계별 프로젝트의 주요 내용 및 참고문헌, 그리고 주요 참여기관을 열거하였다. 표에서 Task는 연구 과제를 의미하며, BMT는 Benchmark Test 모델로서 처분장 특징적 주변 환경을 대표적으로 설정한 모델이며, TC는 Test Case로서 관련 실험실 및 현장 시험 내용을 의미한다. 이 프로젝트는 THM 현상에 대한 심층적 이해 증진 뿐만 아니라, 암석 절리의 분포 특성 및 그 역학 및 수리학적 특성, 암석 균열의 생성 및 전파, 암석의 시간의존성 거동, 암석의 화학적 작용의 영향 등에 대한 다양한 암반공학 연구주제들에 대한 오랜 기간의 연구 성과들을 축적하면서 암반공학 발전에 기여해 왔다.

표 1. DECOVALEX 프로젝트의 각 단계별 주요 과제 내용[7]

Phase I/년도	과제명	주요 내용	주요 참고 문헌
DECOVALEX -I 1992-1995	BMT1	열원이 있는 두개의 직교 연장 절리 시스템 압박	Coupled-T-H-M Process of Fractured Media (Stephansson et al., 1996) Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. Vol. 32 No. 5, 1995
	BMT2	유한 길이 열원의 4개 이산 절리 시스템을 갖는 압박	
	BMT3	Stripa 광산으로부터의 6580개의 실제 균열망 압박	
	TC 1	단일 절리 암석 코어의 실험실 전단-유동 시험	
	TC 2	Fanay-Augeres의 균열 압박의 현장 실험	
	TC 3	공학 완충재의 대규모 실험실시험(Big-Ben, 일본)	
	TC 4	암석 균열의 실험실 응력-유동 시험	
	TC 5	단일 절리의 암석 블록의 전단-유동 실험실 시험	
	TC 6	356m 심도에서의 수리 주입 현장 시험	
DECOVALEX -II 1995-2000	Task 1	영국 Nirex 압박 조사시설(RCF) 수갱 굴착 수치해석	Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 38 No. 1, 2001
	Task 2	일본 PNC의 Kamaishi 광산 현지 THM 실험	
	Task 3	암석 절리의 구성방정식 연구 현황 정리	
	Task 4	방사성폐기물 처분장의 설계 및 성능평가와 관련된 THM 상호 작용의 현 단계의 이해	
DECOVALEX -III 2000-2003	Task 1	FEBEX (Full-Scale Engineered Barriers Experiment in Crystalline Host Rock)	Proceedings of GeoProc 2003 Special Issue of Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 42 No.5-6, 2005
	Task 2	Yucca Mountain의 갱도 시험 (Drift Scale Test)	
	BMT 1	핵폐기물처분장의 근거리장 안전에 대한 THM 상호작용의 의미	
	BMT 2	균열 압박의 THM 물성의 Upscaling 및 대규모 처분장 성능평가의 중요성	
	BMT 3	THM의 빙하작용의 영향 및 균열 압박 내 심부 지질 처분장에 대한 의미	
DECOVALEX -THMC 2004-	Task A	사용 후 핵연료 처분장의 성능에 대한 근거리 상호작용 현상의 영향	Proceedings of GeoProc. 2006
	Task B	굴착손상영역(EDZ)의 특성 이해	
	Task C	Tournemire 현장(프랑스)의 퇴적암반 굴착 손상 영역	
	Task D	화산암 및 결정질암-벤토나이트 시스템의 THM 및 THC 작용으로 인한 EDZ 및 근거리장의 장기 투수율/공극률 변화	
	Task E	장기 기후 변화와 관련된 THM 작용: 빙하 사례 연구	

표 2. DECOVALEX 프로젝트 기금 출연 기관 및 연구팀

약자	국가	기금출연기관명	연구팀 명(약자)
SKB	스웨덴	Swedish Nuclear Fuel & Waste Management Co.	Chalmers Univ. of Tech.(CTH)
			Clay tech. AB, (CLAY)
SKI	스웨덴	Swedish Nuclear Power Inspectorate	Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL, 미국)
			Royal Institute of Technology (KTH, 스웨덴)
STUK	핀란드	Radiation and Nuclear Safety Authority	Helsinki University of Technology (HUT)
			FRACOM Ltd
			Uppsala University (UU, Sweden)
ANDRA	프랑스	National Agency for Radioactive Waste Management, France	INERIS-LAEGO, Ecole des Mines de Nancy (EMN)
			Ecole Polytechnique (EP), G3S
CEA	프랑스	Commissariat a l'Energi Atomique de Cadarache	CEA/DM25/SEMT
IRSN	프랑스	Institute for Protection and Nuclear Safety	Paris School of Mines (PSM)
DOE	미국	Department of Energy	Sandia National Lab. (SNL)
			LBNL
NRC	미국	Nuclear Regulatory Commission	CNWRA, Southwest Research Institute (SWRI)
OPG	캐나다	Ontario Power Generation	Atomic Energy of Canada Ltd.(AECL)
CNSC	캐나다	Canadian Nuclear Safety Commission	Canadian Nuclear Safety Commission
JNC (JAEA)	일본	Japan Nuclear Cycle Development Institute (현재 JAEA)	Tokai Works, JNC
			Hazama Corporation
			Kyoto University
NIREX	영국	Nirex Ltd.	Univ. of Birmigham (UoB)
BGR	독일	Federal Institute for Geosciences and Natural Resources	Univ. of Tuebingen
			Univ. of Hannover,
			Federal Institute for Geosciences and Natural Resources
ENRES A	스페인	Empresa nacional de Residoos Radioactivds, SA	Universidad Politecnica de Catalunya
			Universidad Politecnica de Valencia

2.2 DEOCOVALEX-THMC Task B

표 1에 나타낸 바와 같이 DEOCOVALEX-THMC 프로젝트는 처분장 설계 및 성능평가에 초점을 맞춘 THMC 상호작용 관련 총 5개의 연구과제가 진행 중에 있다. 이 중 Task B는 결정질 암반의 굴착 손상영역과 관련된다. EDZ는 처분공과 수갱 또는 시추공 벽면 주위에 발생하여 잠재적으로 지하수 유동 통로를 형성할 수 있으며 이를 통한 핵종 이동의 가능성이 있으므로 처분장 성능 및 안전 평가에 중요하다[4].

그림 1은 방사성폐기물 처분장 주변에서 전개되는 EDZ의 주요 발전단계를 설명하고 있다.

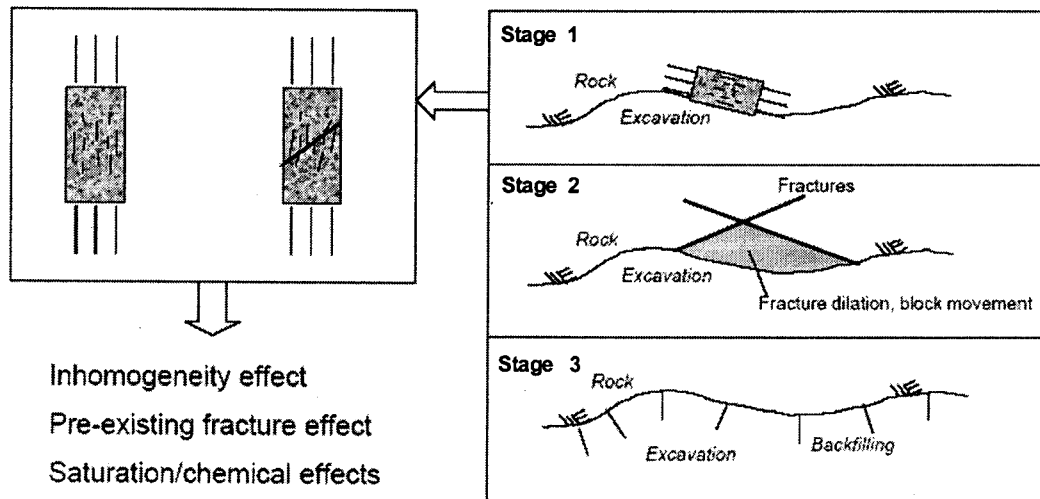


그림 1. 처분장 생애주기 동안 EDZ 발전의 주요 3 단계

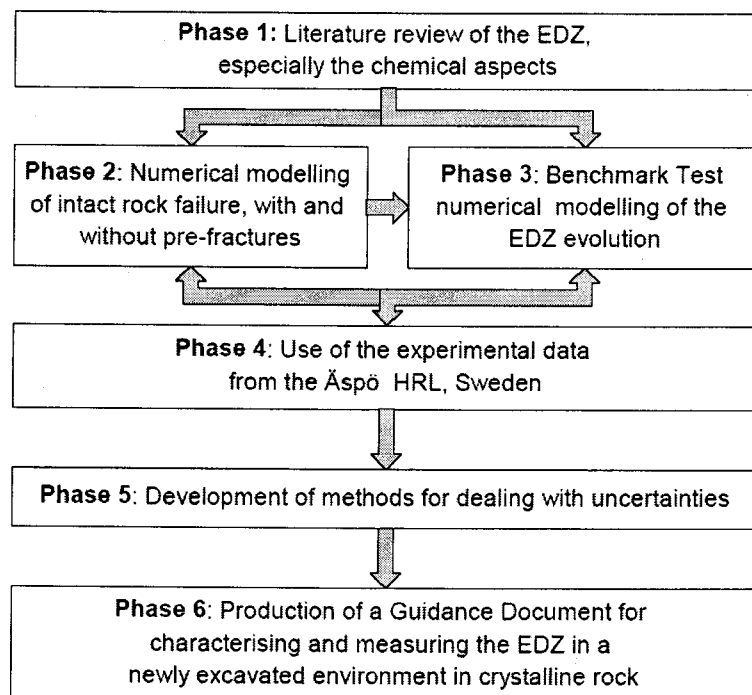


그림 2. Task B의 6가지 연구 단계 Flow chart

Stage 1: 초기 굴착 단계: 주로 역학 및 수리 환경을 변경시킴

Stage 2: 굴착 후 폐쇄 전 단계: 굴착 면으로의 물 유동, 암석의 건조가 발생하며 균열을 따라 화학적인 변화가 발생

Stage 3: 처분단계: canister와 충전재(backfill)가 설치되고 온도 증가하여 장기간에 걸쳐 새로운 평형상태에 이르는 과정

그림 2는 DECOVALEX-THMC 프로젝트 Task B의 연구과제의 진행 단계를 보여준다. 그림 2에서 Phase 1은 주로 화학적 반응 측면에 집중되었는데, 다른 역학적 부분은 이미 많은 지식들이 축적되어 왔기 때문이다. Phase 2는 EDZ의 특성을 정확히 모델화하기 위한 구성방정식의 확립을 위해 일축압 축하의 무결암의 파괴를 모사하는 수치모델 결과의 비교를 주목적으로 한다. Äspö 지하암반 실험실로부터의 암석 코어의 결과를 활용한다. Phase 3은 본 논문에서 주로 다루는 BMT 모델로서 다양한 연구진들에 의한 wall block 및 근거리장(near-field)에서의 손상영역의 특성 모델의 수치해석 비교를 실시한다. Phase 4에서 SKB의 EDZ 관련 실험 결과를 통합하여 가능한 불확실성을 고려할 수 있는 방법을 Phase 5에서 통합하여 최종적으로 결정질 암반에서 굴착 시 EDZ의 특성 및 평가에 대한 지침서를 발간할 예정이다. 그림 3은 Phase 2에서 수치해석으로 구현된 기본 일축압축 특성을 모식적으로 보여준다. Äspö 지하암반 실험실 주변 암석 코어에서 발생하는 전형적인 Class II 거동의 암반의 형태를 나타내며, 일반적인 변형률 연화 현상과는 차이를 보인다.

Phase 3의 BMT 모델의 해석 결과 내용은 이후에 상술한다.

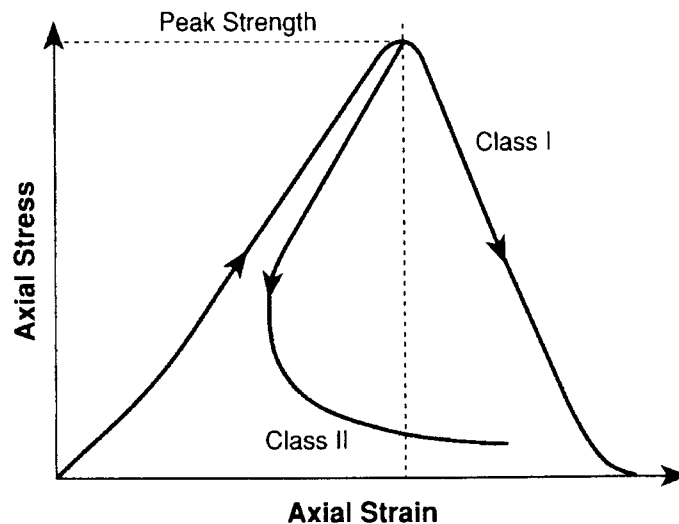


그림 3. Class I 및 Class II 거동의 정의

3. 손상 영역 고찰을 위한 BMT 모델

Phase 3 과제에서는 그림 4와 같이 THMC 환경하의 처분장 생애주기인 1 백만 년에 걸친 EDZ 전개 양상을 모사하기 위해 두 가지 다른 규모의 모델 도메인이 설정되었다. 즉 근거리장 모델은 (near-field model) 갱도 벽면으로부터 몇 m 정도까지의 범위를 나타내며 EDZ의 전개 및 연장을 고려한다. 훨씬 작은 규모의 wall block 모델은 EDZ 내부에서의 THMC 과정의 상세해석을 위해 고안되었다. 그림 5와 6은 다양한 균열 정도를 고려한 전형적인 BMT 모델을 보여준다.

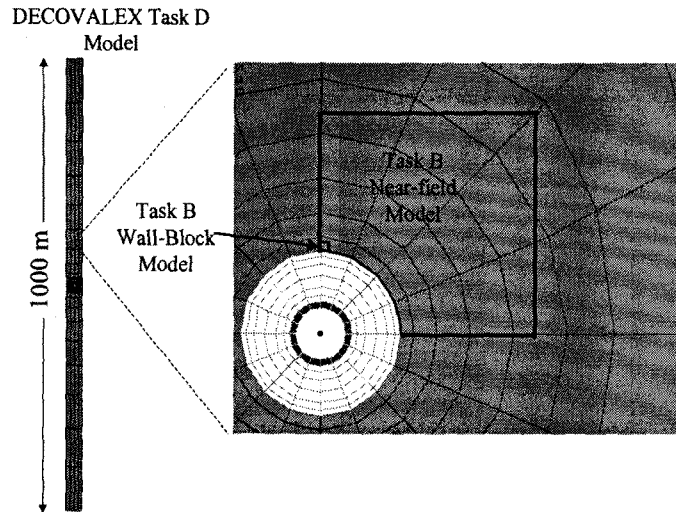


그림 4. Task B BMT 모델의 위치

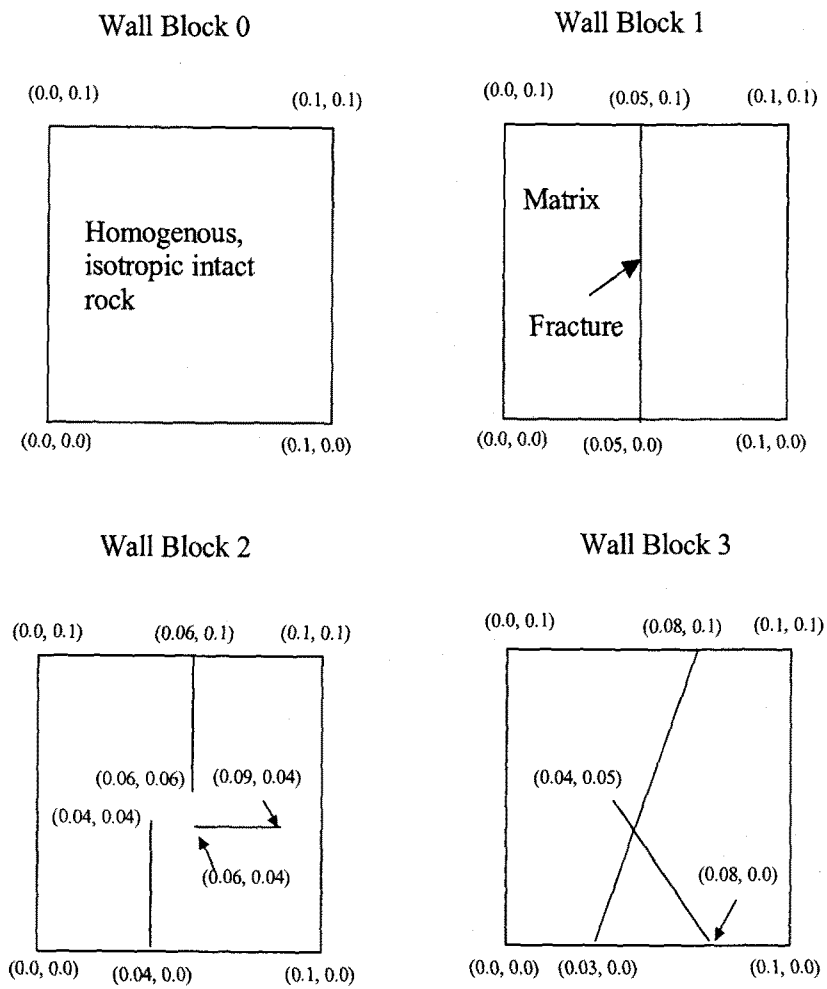


그림 5. 4가지 형태의 wall block 모델

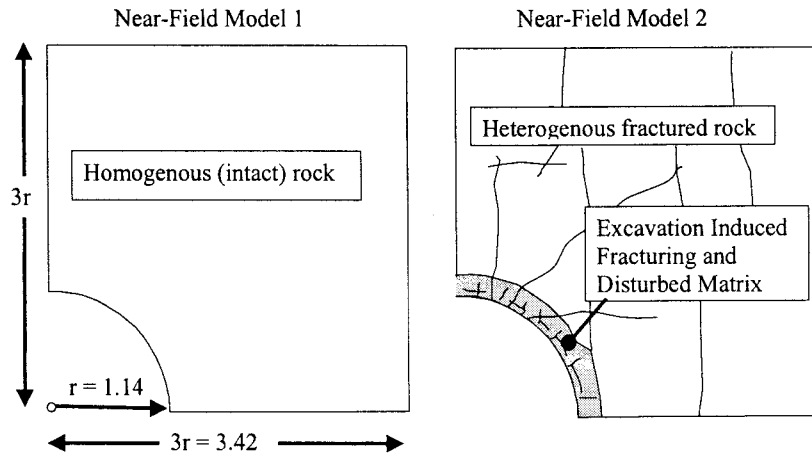


그림 6. 2가지 형태의 근거리장 모델

근거리장 및 wall block 모델이 일반적인 THM 해석 도메인에 비해 매우 작은 영역이므로 THMC 환경은 특별히 고안된 시간의존 경계조건 및 내부조건을 통해 재현되었다. 이 BMT 해석을 위해서 DECOVALEX-THMC Task D에서 수행된 대규모 THC 및 THM 해석의 결과를 사용하여 시간의존 경계 및 내부 조건을 설정하였다[6].

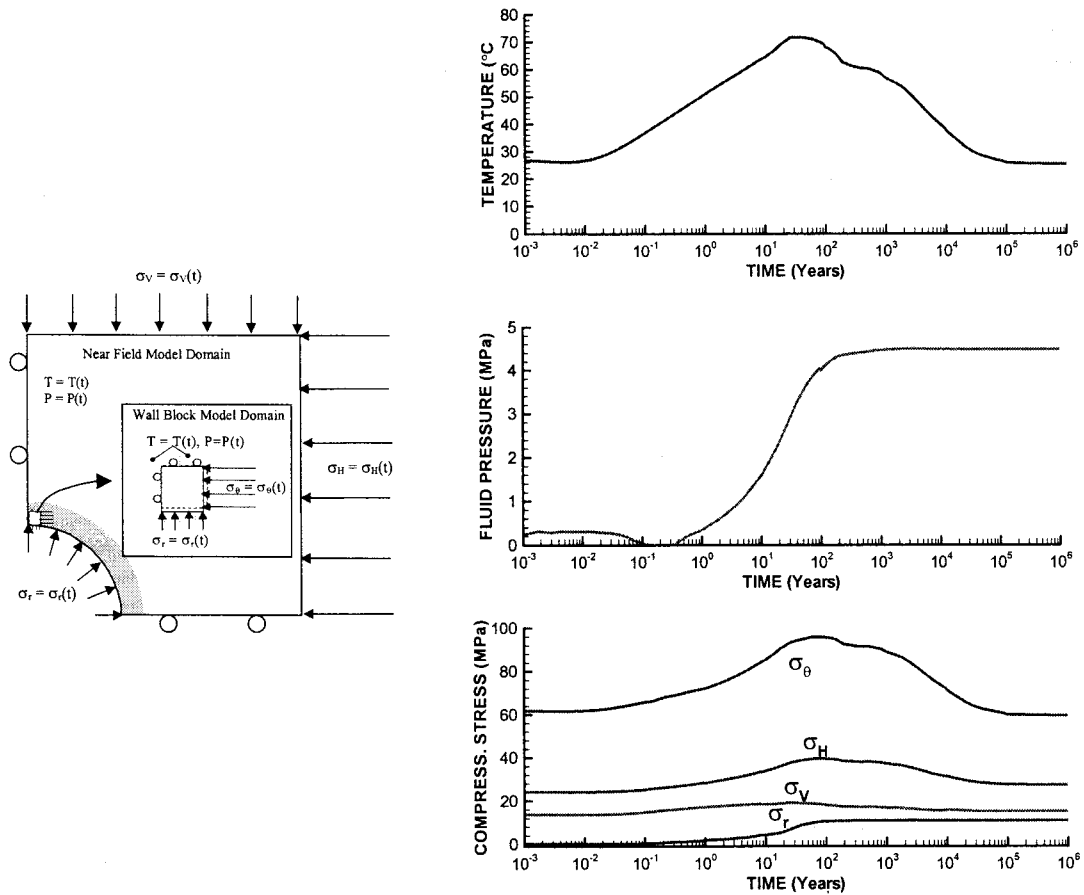


그림 7. 해석에 사용된 시간의존 THM 경계 및 내부 조건(Rutqvist et al., 2006a).

각 해석은 다음과 같은 단계로 진행되었다.

- Stage 1—Linear thermal-hydro-elastic modeling:** 선형 탄성 물성으로의 모델링
- Stage 2—Non-linear, elasto-plastic failure modeling:** 비선형/탄소성 특성 고려한 파괴 해석
- Stage 3—Time dependent failure modeling:** creep 및 역학적 분해를 고려한 시간의존거동 모델
- Stage 4—Chemo-mechanical modeling (optional):** 단순화한 화학반응 고려하거나 다른 화학/역학 영향 고려
- Stage 5—Full THMC modeling (optional):** 4단계에서 개발된 화학-역학 모델을 THC 및 THM에 결합한 완전 상호작용 모델

표 3은 BMT 모델에 참여한 연구진들 및 사용된 해석 기법을 보여준다.

표 3. BMT 모델의 연구진 및 수치해석 기법

연구진	수치해석 기법
DOE: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)	유한차분법을 이용한 TOUGH-FLAC 모사
	ROCMAS 유한 요소 코드
CAS: Chinese Academy of Sciences' Research Team	Cellular automaton 접근법
FRACOM: FRACOM Ltd, Finland	이산 경계요소 균열전파 모델인 FRACOD
JAEA: Japan Atomic Energy Agency's Research Team, including Kyoto University	THAMES 유한요소 코드
SKI: Royal Institute of Technology, Stockholm	PFC 개별요소 입자 모델

4. 모델 해석 결과

4.1 근거리장 모델

근거리장 모델 Stage 1의 해석 결과는 3.42m×3.42m의 상대적으로 작은 모델 도메인으로 인해 모델의 하부 우측 코너부에 이례적인 응력집중을 발생시켰다 (그림 8). 하지만 그림 9에 나타난 바와 같이 주요 관심 대상인 공동 벽면 주변에서는 이 모델 도메인으로도 충분한 정확도를 나타냈다. BMT 모델은 공동 벽면 1m 이내에서의 EDZ의 전개 과정에 초점을 맞추었으므로, 보다 세밀한 요소망을 이용하면 이 정도의 도메인으로 충분할 것으로 사료된다(그림 9). 또한 그림 9에 비교한 바와 같이 완전 THM 상호작용을 모델을 고려한 경우와 본 연구에서와 같이 시간의존 특수 경계 및 내부 조건을 고려한 경우 결과적인 응력분포는 공동 벽면 주변에서 잘 일치하므로 특수 경계조건 사용의 적합성을 확인하였다.

Stage 1의 해석 결과는 spring line을 따라서 인장 균열 또는 반경방향 기존 균열의 벌어짐이 발생할 것으로 예측되었으며, 반면에 벽면 crown 부에서는 전단 파괴의 가능성이 있음을 보여준다. 3개 연구팀 (DOE, FRACOM and CAS)의 결과는 응력 면에서는 상당히 잘 일치함을 보여주었다. 하지만 변위의 경우에는 FRACOM의 결과가 다소 다르게 나타났는데, 이는 모델에서 내부 열에 의한 열변형을 직접적으로 고려하지 않았기 때문이다. 그 다음 단계로서 그림 6에 나타난 실제 자연 절리 발달을 고려한 모델은 이 논문에서는 다루지 않는다.

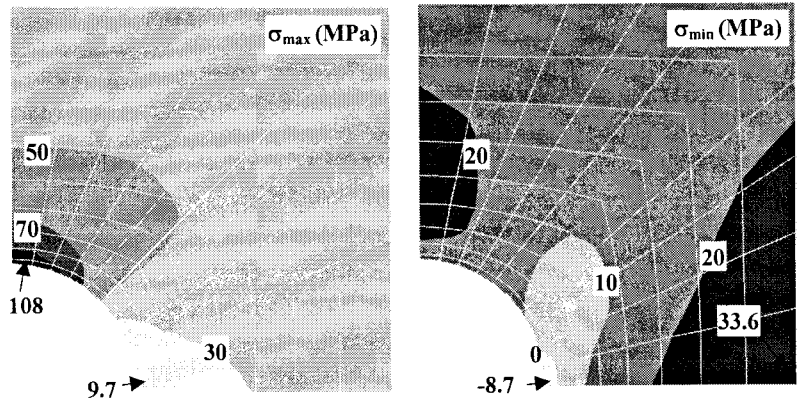


그림 8. Stage 1에 대한 100년 후 근거리장 모델: 최대 및 최소 주응력 분포 (DOE 연구진)

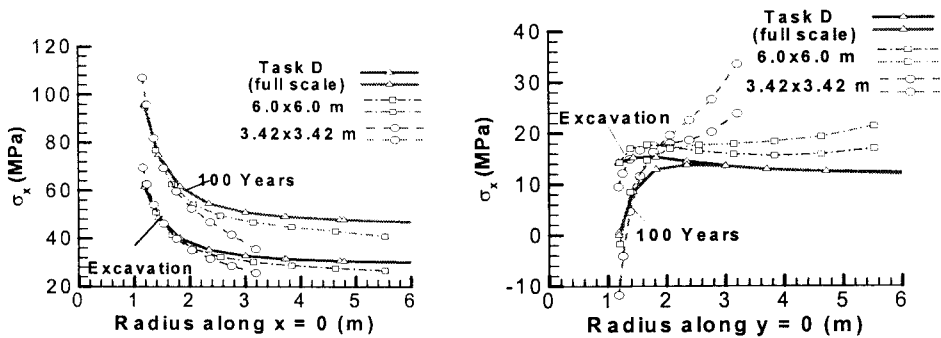


그림 9. Stage 1에 대한 100년 후 근거리장 모델: x=0, y=0을 따라서의 응력 분포 비교 (DOE 연구진)

4.1 Wall block 모델

Wall block 모델 해석 결과는 블록 내의 응력 분포는 균열의 존재 여부와 그 기하형상에 따라 매우 의존함을 보여주었다. 그 일례로서 Wall-Block 모델 2 (WB2)에 대해 처분 후 100년이 경과한 후 3개 다른 모델을 사용한 계산 결과가 그림 10에 나와 있다. 압축응력이 100년 경과 시 최대 주응력이 110MPa를 초과하는 중앙 무결암 부분에 집중된다. 하지만 계산된 최대주응력 크기는 사용된 모델에 따라 상당히 차이가 났는데, 이는 요소망의 이산화 정도의 차이에 주로 기인한 것으로 생각된다. 특히 기존 균열 주변의 상세한 응력 분포에 대한 정확한 계산을 위해서는 보다 세밀한 요소망의 사용이 필요하다.

그림 11은 WB0와 WB3의 바닥(갱도 벽) 표면을 따라서의 수직 및 수평 변위 단면도를 보여준다. DOE, CAS 및 JAEA의 계산결과는 서로 상당히 비슷하지만 완전히 일치하지는 않았다. WB0(무결암석)에 대해 계산된 변위는 다음과 같은 해석해(analytical solution)를 이용하여 비교될 수 있다.

$$\frac{u_x}{L_x} = -\frac{(1-\nu^2)}{E}(\Delta\sigma'_x) + \frac{\nu(1+\nu)}{E}(\Delta\sigma'_y) + (1+\nu)\alpha_T\Delta T \quad (1)$$

$$\frac{u_y}{L_y} = \frac{(1-\nu^2)}{E}(\Delta\sigma'_y) - \frac{\nu(1+\nu)}{E}(\Delta\sigma'_x) - (1+\nu)\alpha_T\Delta T \quad (2)$$

여기서 압축응력이 +이다. 식(1) 및 (2)에서 u_x 와 u_y 는 각각 L_x 과 L_y 이 0.1 m 일 경우 블록의 우하부 코너에서의 x- 및 y-변위를 나타낸다. α_T 는 암석의 열팽창계수이며 나머지 변수들은 흔히 탄성학에서 사용되는 기호를 따랐다. 그림 12는 위 식에서 구한 해석해 결과와 우하부 코너에서의 x- 및 y-변위 결과를 비교한 것이다. 결과는 DOE에 의한 해석 결과는 해석해와 잘 일치하였지만, CAS와 JAEA의 결과는 어느 정도 일치하였지만 약간의 차이를 보였다. 이러한 차이는 내부 및 경계조건을 적용하는데 있어서 BMT 해석의 차이에 기인하는 것으로 보인다. FRACOM에 의해 계산된 결과는 다른 팀들의 결과와 상당한 차이를 보였는데 이는 경계요소 모델에서 내부 열팽창의 영향을 배제되었기 때문이다. 응력 수준에 기초한 암석 균열이 주요한 관심사일 경우에는 이러한 FRACOM의 접근법도 실용적인 면에서 타당하지만, 정확한 열변형이 고려되어야 할 경우에는 문제가 될 수 있다.

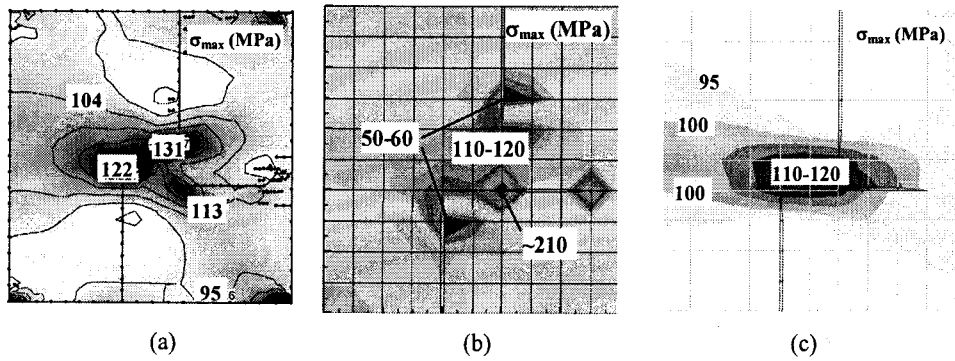
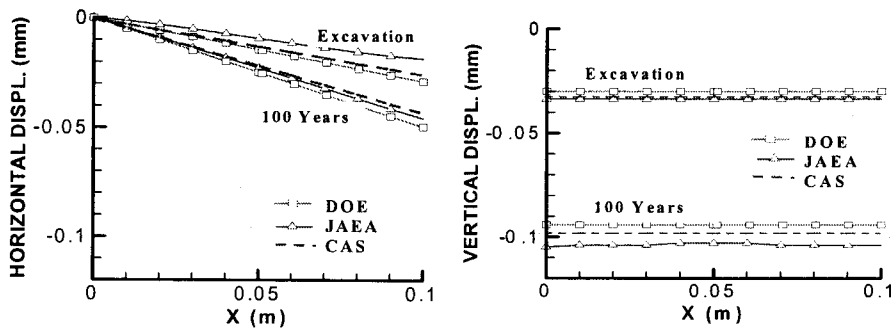
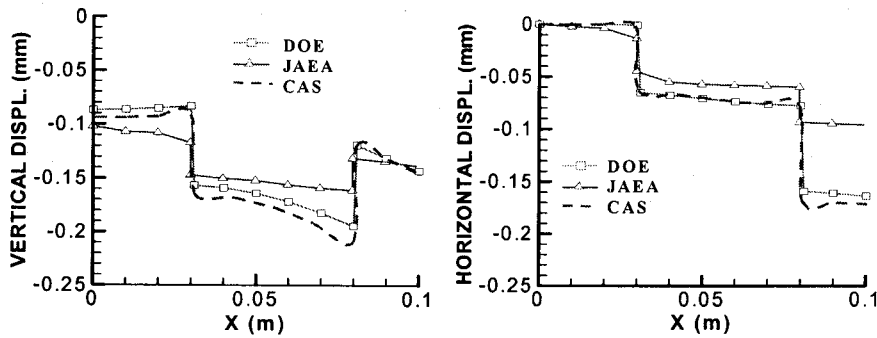


그림 10. WB2에 대한 100년 후 최대주응력 분포 (a) FRACOM (b) CAS (c) DOE



(a) WB0



(b) WB3

그림 11. WB0 및 WB3에 대한 바닥면(공벽면)을 따라서의 수직, 수평 변위 비교

DOE 및 CAS에 의한 민감도 분석 결과 내부 열팽창은 계산된 변위에 큰 영향을 주지만 응력 분포에는 별 영향을 주지 않는다. 이 경우에는 발생 변위가 매우 작으므로 (0.1mm 이내) 모델 결과 비교에는 크게 중요하지 않다. 따라서 이 BMT case의 경우에는 내부 열팽창을 무시하여 응력 분포와 파괴 과정에 초점을 맞추어 해석하는 것이 가능할 것이다.

초기 단계에서 FRACOM 및 CAS에 의한 Stage 2의 결과가 그림 13에 나와 있다. 경계요소법을 사용한 이산 균열 전파를 모델링한 결과와(FRACOM) cellular automation법을 이용한 유도 소성변형의 경우(CAS)가 대체적으로 양립하고 있다. 하지만, 보다 상세한 요소 세밀화를 통해서 상세한 비교가 필요하다.

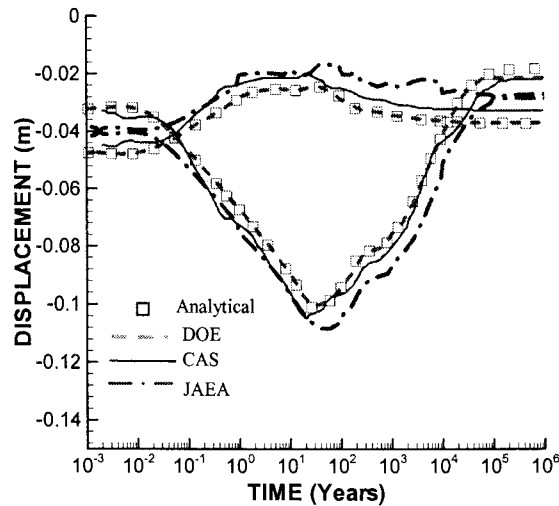


그림 12. WBO의 하부 우측 모서리(0.1,0)에서의 수평 및 수직 변위 비교

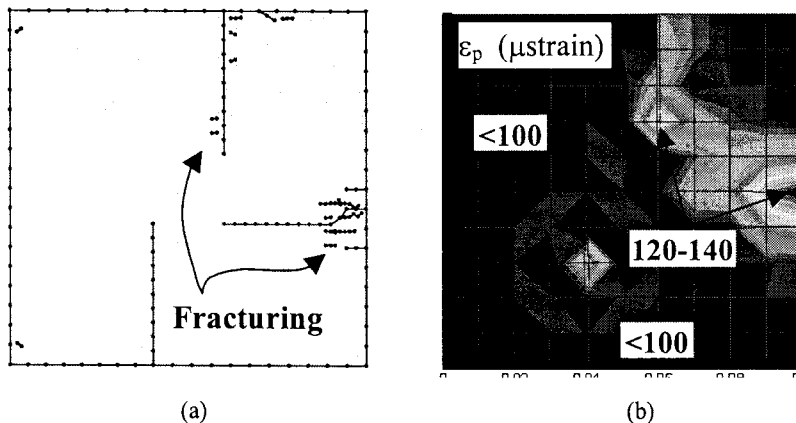


그림 13. 처분 후 100년 경과 시 Stage 2에 대한 예비 결과 (a) FRACOM (b) CAS

5. 결 론

본 논문에서는 DECOVALEX 국제 협력 연구 프로젝트의 현황을 소개하고 방사성폐기물 처분공 주변 굴착 손상영역(EDZ)에서의 열, 수리, 역학 및 화학 상호작용으로 인한 영향을 모사하기 위한

국제 협력 BMT 모델링의 결과를 제시하였다. 특수 경계 및 내부 조건을 고려한 두 가지 BMT 모델 도메인으로부터의 해석결과는 연구진들 사이 상세한 해석 기술에 있어 어느 정도의 불일치가 존재하지만 EDZ 영향을 설명할 수 있는 좋은 방법임을 확인하였다. 근거리장 모델 해석의 경우 최대주응력은 갱도 crown에서 약 100MPa 정도였으며 최소 주응력은 약 10MPa를 보였다. 이 정도의 응력 크기는 무결한 화강암반에서 즉각적인 파괴를 야기할 만한 수준은 아닌 것으로 보인다. 하지만 80-100MPa 정도의 큰 압축응력이 수천 년 동안 유지되고 60MPa 이상의 응력이 전체 100,000년 이상 전 처분 생애주기 동안에 지속됨을 유의해야 한다. 이러한 조건은 암석을 약화시키는 응력 부식(stress corrosion) 현상을 야기할 수 있으며, 심각한 시간의존 거동을 발생시킬 수 있다. 또한 기존 균열이 있는 wall block 모델의 경우 그 이상의 응력 집중을 보여서 파괴 과정에 큰 영향을 줌을 확인하였다. 이러한 영향은 향후 BMT Stage 2와 Stage 3의 상세한 연구를 통해 규명될 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 국제 협력 연구인 DECOVALEX-THMC 프로젝트의 일환으로 수행되었으며 본문에서 언급한 모든 기금 출연 기관 및 공동 연구를 진행하고 자료를 제공한 Task B 관련 모든 연구진에 깊은 감사를 드립니다.

■ 참고문헌 ■

1. 권상기, 박정화, 최종원, 강철형, 2002, THM coupling 메커니즘에 대한 고찰 - 심지층처분 시스템 개발, 한국원자력연구소 연구 보고서, KAERI/AR-627/2002
2. 황용수, 1997, DECOVALEX 국제 공동연구 현황 분석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, Vol. 7, 246-252.
3. Lee H.-S., Rinne, M. and Shen, B. 2006. Modeling discrete fracturing of wall blocks on a deposition hole by THM loading. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 332-337.
4. Rutqvist, J., Feng, X.-T., Hudson, J., Jing, L., Kobayashi, A., Koyama, T., Pan, P.-Z, Lee, H.-S, Rinne, M., Sonnenthal, E. and Yamamoto, Y., 2006a, Multiple-code benchmark simulation study of coupled THMC processes in the excavation disturbed zone associated with geological nuclear waste repositories. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 397-402.
5. Rutqvist, J., Sonnenthal, E., Jing, L. and Hudson, J. 2006b. Task definition for DECOVALEX THMC Task B, Phase 3: A Bench Mark Test on Drift Wall Coupled THMC Processes.
6. Rutqvist J., Birkholzer J.T., Chijimatsu, M., Kolditz, O., Liu, Q.-S. Oda, Y., Wang, W. and Zhang, C.-Y. 2006c. Comparative simulation study of coupled THM processes near back-filled and open-drift nuclear waste repositories in Task D of the International DECOVALEX Project. Proceedings of GeoProc 2006 Conference, 428-433.
7. Stephansson, O., Tsang, C.-F., Jing, L. and Kautsky, F., DECOVALEX project 1992-2006: purposes, tasks and main achievements, Proceedings of GeoProc 2006 Conference, Nanjing, China, 31-44.